ChinaXiv合作期刊

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.05.10

秦岭森林物候时空分布特征及对水热条件的响应[①]

王　钊[1]，　彭　艳[2]，　权文婷[1]，　何慧娟[1]，李登科[1]

（1　陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心，陕西　西安　710015；　2　陕西省气象科学研究所，陕西　西安　710016）

摘　要： 大量观测数据分析表明，全球气候正逐步变暖。植物物候现象是全球自然环境变化的指示器。物候对气候变化的响应是研究全球气候变化的重要手段之一。森林是全球生态系统的重要组成部分，森林物候特征变化是反映气候变化对森林生长影响的综合性生物指标。利用2001—2018年MOD09A1卫星数据重建了秦岭地区增强型植被指数（*EVI*）序列，采用最大变化速率和阈值法结合提取了秦岭森林物候参数，结果表明：（1）Whittaker滤波法在灌木、农田、森林3种生态样地重建中稳定性较好，在秦岭山地有较好的适用性。（2）秦岭地区物候多年均值分布同秦岭地区水热条件密切，由高海拔高山区到农耕区，生长季始期（Start of Growth Season，SOG）逐渐提前，生长季末期（End of Growth Season，EOG）逐渐推迟，生长季长度（Length of Growth Season，LOG）由高海拔区向低海拔区逐渐加长。秦岭浅山区和东部伏牛山农耕带生长季（SOG）开始较早，出现在3月上旬，高山区针叶林带生长季开始的较晚，出现在5月上旬到中旬（120～135 d）之间。生长季末期（EOG）集中出现在10月～11月初（270～310 d），高山区针叶林带生长季结束较早，浅山区植被生长季结束较晚，普遍出现在11月（300 d）以后。生长季长度（LOG）分布在150～200 d之间，低海拔地区LOG较长，大于180 d，高海拔林区生长季较短LOG集中在150～170 d。（3）年际变化特征：2001—2018年生长季始期（SOG）呈现提前趋势，其中高海拔区提前明显，南北麓海拔低于500 m部分区域和东部伏牛山少部分区域出现推迟。生长季末期（EOG）呈现推迟趋势，其中秦岭北麓和东部中低海拔区域推迟明显，生长期长度（LOG）总体呈延长趋势。（4）秦岭地区近17 a气温呈现上升趋势，变化率为0.02 ℃·a^{-1}，降水呈现不明显的上升趋势，日照时数则呈现明显的下降趋势，变化率为14.6 h·a^{-1}。（5）秦岭地区物候参数同0 ℃、5 ℃和10 ℃界限温度、降水、日照时数相关性分析表明，全球变化下的升温作用是影响秦岭森林物候变化的主要因子，升温作用导致SOG提前，EOG推迟、LOG延长，主要集中在秦岭南北麓1 000～2 000 m之间，秦岭东部伏牛山低海拔区境内相关性最低，表明受温度制约较小。

关 键 词： 秦岭；物候；生长季末期（EOG）；生长季始期（SOG）；生长季长度（LOG）

物候是指生物长期适应气候条件的周期性变化，形成与此相适应的生长发育节律，是反映生态系统对气候变化响应的最直观的指示器，通过对森林物候的研究，反映气候变化对树木生理、树种组成、森林生产力等方面的影响，对于生物多样性保护具有重要的意义。物候研究是地理学研究的热点之一，大尺度的植被生长季监测是生态环境研究中一个重要科学问题[1-2]。常用的物候监测方法有地面观测法、遥感监测法、模型监测法等。地面观测法对于小区域范围的物候研究具有时间精度高、易于操作等优点，但是难以反映区域尺度的物候状况，卫星可以在像元尺度上监测植被群落的时序特征，结合地面数据对其参数化，可以反映空间尺度物候特征[3-10]。自1990年LLOYD等[11]提出利用阈值法提取植被物候参数，遥感物候监测在生物多样性、土地覆盖分类、农作物估产、生物量估算等多个领域应

① 收稿日期：2019-01-27；　修订日期：2019-05-10

基金项目：中国气象局气候变化专项“气候变化背景下秦岭地区植被生态环境演变与风险适应”；陕西省自然科学基金面上项目（2018JM4024）和陕西省科学研究发展计划项目（2013K02-20）

作者简介：王钊（1980-），男，硕士，研究方向为遥感与气候变化. E-mail：sandstorm@163.com

chinaXiv:201909.00159v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00159v1

用,物候已经成为研究陆地生态系统有效的桥梁。遥感获取物候参数方法上已有大量研究,例如,植被类型生长的 *NDVI* 阈值法、最大变化斜率方法等。同时遥感监测的物候信息与地面台站的实际观测数据的相互关系越来越受到关注。FISHER 等[12]结合地面物候观测数据、Landsat 和 MODIS 的 *NDVI* 数据集指出不同源的遥感监测结果可以描述同一区域的地面物候。KROSS 等[13]研究表明时间分辨率为 10 d和 15 d 的 *NDVI* 数据集适合用于提取地表植被的物候信息。大量研究证实,在过去的几十年,北半球植物生长季呈现逐渐延长趋势,高纬度地区春季物候的提前导致森林碳汇增加[14],在我国大部分地区,地面和卫星观测数据印证了物候同样的变化趋势[15-25]。

秦岭横亘于我国中部,地处我国暖温带和亚热带的生态过渡带,是中国南北地理分界线,有广义和狭义之分:广义秦岭西接昆仑山,起自岷山以北,向东延伸经由甘肃境内、陕西南部到达河南境内伏牛山一带,狭义的秦岭只限于陕西境内渭河与汉江之间的山区。近年来随着城市化进程推进,人类活动加剧导致部分区域植被出现退化[26-27]。而处于海拔 2 800 m 以上的高山区植被,因为人迹罕至,受气候变化影响较大。目前,涉及到秦岭不同海拔区域的植被物候响应已经有部分研究成果[28-30],科研工作者在秦岭山区植被退化及其驱动因素、以及秦岭山脉物候的时空变化方面进行了分析,虽然涉及了秦岭物候的时空变化,但由于时间序列较短或者过于宏观,对物候变化的原因及对气候要素的响应缺乏相关的分析。本研究利用 2001—2018 年卫星数据,提取秦岭地区不同海拔梯度物候变化,探讨了人类活动和气候变化双重作用下,不同高程下植被物候的响应特征,为秦岭生态保护提供重要的理论依据。

1　研究区域概况

研究区域为广义秦岭,包括甘肃、陕西、河南 3 省的 43 个县[31],境内自西向东分布着小陇山,太白山、熊耳山、华山以及伏牛山等,长约 700 km^2,总体上同 1 月份 0 ℃等温线走向一致,年平均气温 12 ~ 14 ℃,平均降水量为 700 ~900 mm。图 1 给出了研究区域土地利用分布情况,林草分布在较高海拔地区,耕地分布在海拔较低的山谷地区,中部山地海拔垂直落差大,形成不同植被类型带谱,自下而上分为:农耕带(海拔 200 ~700 m);落叶阔叶林带(海拔 700 ~1 300 m);落叶栎林带(海拔 1 300 ~2 300 m);桦木林带(海拔 2 300 ~2 800 m);针叶林带(海拔 2 800 ~3 200 m)以巴山冷杉林和太白红杉林为代表,针叶林分布上界代表森林上限;高山灌丛草甸带(海拔 3 200 m 以上),秦岭南北由于气候条件差异,分布稍有差别[32]。为了提高验证精度,结合高分土地利用数据和地面调查选出 9 个典型生态样地,涵盖森林、灌木、农田等植被类型。

2　数据与方法

2.1　植被指数计算

采用 NASA LP DAAC(Land Processes Distributed Active Center)提供的 2001—2018 年 C5 版本 MOD09A1 产品,包含1 ~7通道地表反射率、DOY

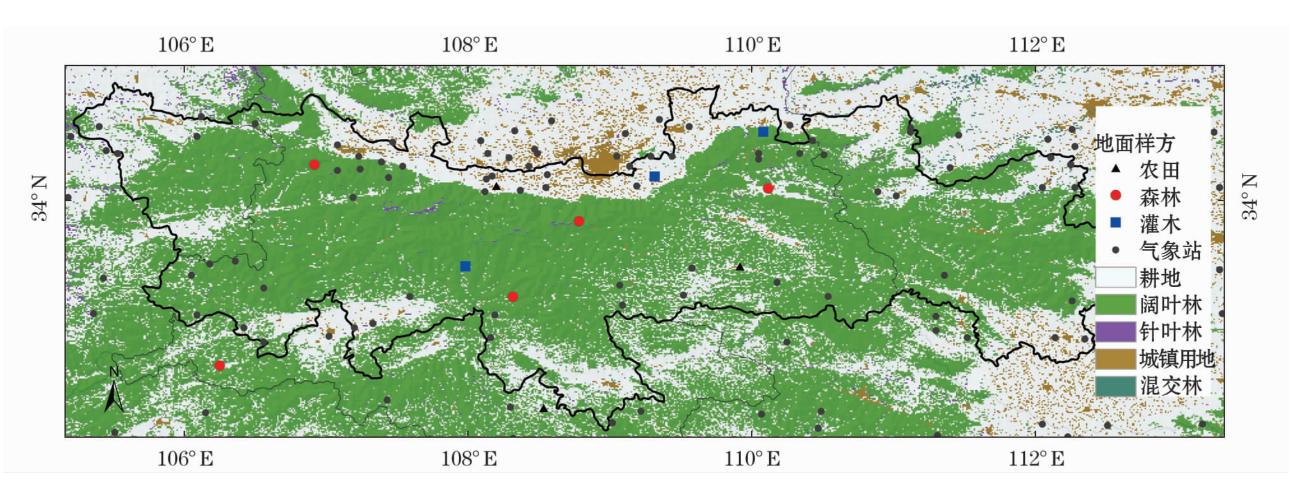


图 1　研究区域土地利用图

Fig. 1　Land use changes of Qinling Mountains

ChinaXiv合作期刊

(Day Of Year)数据,时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 500 m,秦岭位于 H26V5 和 H27V5 区,2001—2018 年共有 822 幅影像,统一采用 SIN GRID 投影。为了剔除非林区影响,使用了 2012 年 MOD12Q1 土地覆盖数据,研究区域内土地覆盖类型基本为林地和耕地,占总面积 95% 以上。

利用 16 d 间隔的 MODIS MOD13Q1 产品统计发现,秦岭高植被覆盖区 *NDVI* 会对叶绿素 a 响应出现饱和现象[33],而 *EVI* 能避免饱和问题,减少大气和土壤背景影响,同时 8 d 比 16 d 时间精度更高。利用 IDL 语言结合 MRT 工具,编写批处理程序,对 H26V5 和 H27V5 区的反射率和 DOY 波段进行拼接和投影,采用公式 1 计算 *EVI*:

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6 \times \rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE} + 1} \quad (1)$$

式中:ρ_{NIR}、ρ_{RED}、ρ_{BLUE} 分别为 MODIS 传感器大气校正后近红外、红光、蓝光波段反射值。为了进一步提高时间精度,引入像元的 DOY 值,在时间序列重构时插值到日值,避免波峰波谷点在 8 d 前后波动。

2.2　分析方法

利用线性倾向估计进行变化趋势分析,变量可以看作是时间的一元线性回归,线性倾向值用最小二乘法估计(公式 2)。

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i t_i - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \sum_{i=1}^{n} t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)^2} \quad (2)$$

式中:B 为线性倾向值;X 为变量;t 为年份;n 为计算的年次。当 $B>0$ 时,随时间 t 的增加,X 呈上升趋势,当 $B<0$ 时,随时间 t 的增加,X 呈下降趋势。B 值大小反映了变量上升或下降的速率,即表示上升或下降的倾向程度,同时采用相关系数的统计检验方法进行趋势显著性检验。

采用变异系数(C_V)评价植被时序稳定性:反映单一像元序列离散程度,C_V 值越小,表明波动越小(公式 3)。

$$C_V = \frac{1}{x}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})_2}{n-1}} \quad (3)$$

用相关系数(R)反映重建后的时序曲线保持原始特征曲线特征的能力,其值越大,保持原始曲线特征的能力越强(公式 4)。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})}} \quad (4)$$

用回归估计标准差(*RMSE*)描述时间序列之间的差异程度,值越小,拟合值的代表性越强(公式 5)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(EVI_{pi} - EVI_{oi})^2}{n}} \quad (5)$$

2.3　*EVI* 时间序列重构

为了减少随机因素对序列的影响,需要进一步对序列重构[34-39],常见算法有:(1) 滤波平滑法,如 Savitzky-Golay 滤波[40]、Whittaker 滤波[30] 等。(2) 函数拟合法,如非对称高斯函数法(Asymmetric Gaussian)、双 Logistic 函数法(Double Logistic Function-fitting)。(3) 频域变换法,如时间序列谐波分析法(HANTS)、小波分析。各种方法对原始序列要求苛刻程度不同,具有不同适用性,尤其是秦岭山地,数据噪声点多,这里选用 Whittaker、双 Logistic(DL)、HANTS、AG 4 种方法重建序列,比较样地保真性和抗干扰性择优使用。

图 2 给出 4 种算法 2001—2018 年灌木、农田、森林样地相关性和 *RMSE* 值,可以得到,Whittaker 相关性最优,DL 和 AG 次之且相当,HANTS 略差。

从 *RMSE* 值来看,Whittaker 在灌木、农田、森林 3 种不同植被覆盖的重建中与原始 *EVI* 之间的差异性最低,表明 Whittaker 拟合值的代表性最强,DL 和 AG 法次之且相当,HANTS 略差。

对比 2014—2016 年 4 种算法 *EVI* 时序曲线,得到:(1) 在灌木样地,4 种方法拟合程度类似,但在峰值区,Whittaker 明显比 AG、DL 和 Hants 抗干扰能力强,对于噪音多的点表现出更好的拟合效果。(2) 在农田样地:生长季初期,Hants、AG 和 DL 拟合结果均偏高,生长季中期至生长高峰期 4 种滤波方法拟合结果一致,并与原始 *EVI* 时序曲线趋势相符。除 Whittaker 外的 3 种滤波方法在 2016 年峰值期存在过度拟合,且呈单峰形态,但 Whittaker 拟合结果呈双峰形态,很好保留了真值。(3) 在森林样地:在生长季初期和枯黄期,4 种滤波方法的拟合结果基本一致,但 2014—2015 年在峰值期,Hants 滤波受噪音干扰拟合值偏高,2016年AG和DL滤波方法拟

chinaXiv:201909.00159v1

ChinaXiv合作期刊

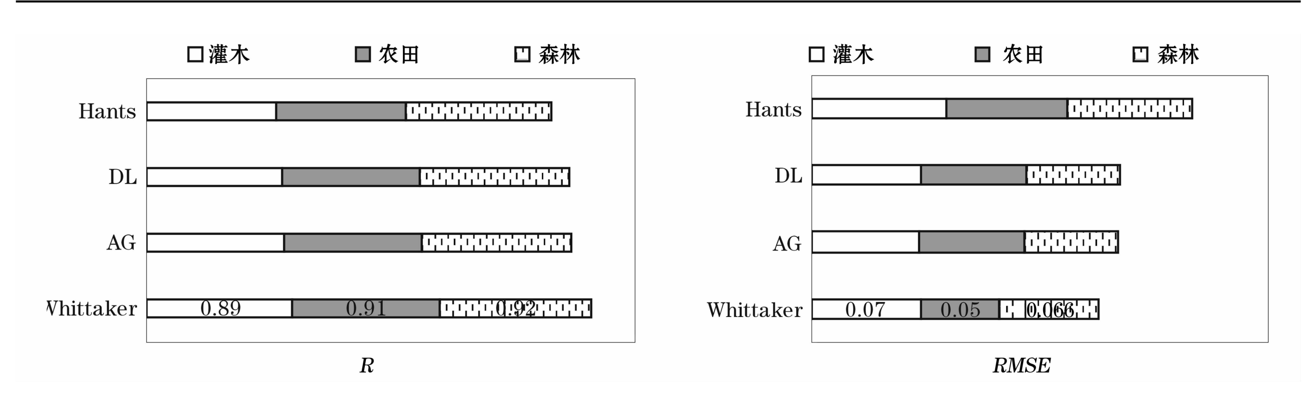


图 2　4 种重建算法的相关性和回归估计标准差

Fig. 2　Standard deviation and the correlation of the Whittaker, HANTS and Asymmetric Gaussian method over Qinling Moutains

合结果偏高, 而 2014—2016 年整个生长期内 Whittaker 与原始 *EVI* 时序曲线趋势最为接近,很好的保留了真值。因此,Whittaker 方法在 4 种方法中表现相对稳定,在秦岭山地有较好的适用性,同 ATKINSON 等[15]的结果一致。

2.4　物候参数提取和验证

常见的物候参数提取方法有阈值法[40]、比值法、最大变化速率法[41]、Logistics 函数法[42-43]等,由于秦岭海拔落差大,单用阈值法对于地形效应体现不明显,这里选择最大变化速率和阈值法结合提取,首先用 Whittaker 滤波重建 2001—2018 年 *EVI* 序列日均值,计算曲线相邻点的差生成 *EVI* 差值序列,取曲线上升期和下降期序列变化最大值为 SOG(Start of Growth Season)和 EOG(End of Growth Season)的 *EVI* 阈值,最后采用逐年日值序列对照阈值指标得到 SOG 和 EOG,EOG 和 SOG 差得到 LOG(Length of Growth Season)。

从中国物候观测网获取了 1963—2008 西安站典型木本植物物候数据,SOG 采用展叶盛期木本植物的日均值,EOG 对应变色期,展叶盛期普遍集中在 4 月上旬(95～100 d),全部变色期集中在 11 月上旬(300～310 d),同卫星提取的基本一致,变化趋势参考王传海[24]、白洁[44]等人木本植物展叶盛期提前 1.5 $d \cdot a^{-1}$,变色期延迟 1 $d \cdot a^{-1}$,同卫星提取的变化趋势基本一致。

3　结果与分析

3.1　2001—2018 年秦岭物候多年均值空间分布特征

图 3a～3c 分别给出了 2001—2018 年秦岭地区生长季始期(SOG)、生长季末期(EOG)和生长季长度(LOG)多年均值分布特征。由图 3,沿着秦岭主要山脊由高海拔的高山区到农耕区,SOG 逐渐提前,EOG 逐渐推迟,LOG 由高海拔区向低海拔区逐渐加长,与秦岭地区地形分布较为一致。秦岭南北浅山区和东部伏牛山农耕带生长季开始较早,出现在 3 月上旬,高山区针叶林带生长季开始的较晚,出现在 5 月上旬到中旬(120～135 d)之间。生长季末期(EOG)集中出现在 10 月到 11 月初(270～310 d),高山区针叶林带生长季结束较早,秦岭处于浅山区生长季结束较晚,普遍出现在 11 月(300 d)以后。LOG 分布在 150～200 d 之间,低海拔地区 LOG 较长,大于 180 d,高海拔林区生长季较短 LOG 集中在 150～170 d。随着海拔升高 SOG 和 LOG 变化明显,秦岭北坡浅山区带及山区居民聚集地周边受人类活动影响较大,物候随海拔变化规律不明显。

3.2　物候的年际变化特征分析

图 4a～4c 分别给出 2001—2018 年秦岭地区生长季始期(SOG)、生长季末期(EOG)和生长季长度(LOG)年际变化趋势的空间分布特征,图 5 给出了秦岭地区生长季始期(SOG)趋势变化显著性检验分布特征。由图 4:(1) 秦岭地区 SOG 分布呈现提前趋势, 其中有 23.45% 象元通过了显著性检验($P<0.01$)(图 5),呈现显著地提前趋势。对于研究区域内的 SOG,有 95% 的区域提前 1～2 $d \cdot a^{-1}$,高海拔区域 SOG 提前较明显,普遍在 2 $d \cdot a^{-1}$左右,南北麓低海拔区和东部伏牛山中部 SOG 呈现推迟趋势,其推迟区域范围同图 3 中所提及的人类活动对植被干扰较大区域基本一致。(2) 秦岭地区 EOG 呈现推迟趋势(图 4b),其中有 21.45% 的像元通过了显著性为 0.01 的检验($P<0.01$)(图略),呈现出显著地推迟趋势。秦岭北麓和东部中低海拔区域推迟明显,推后2～3 $d \cdot a^{-1}$。(3) 秦岭地区LOG变化趋

chinaXiv:201909.00159v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00159v1

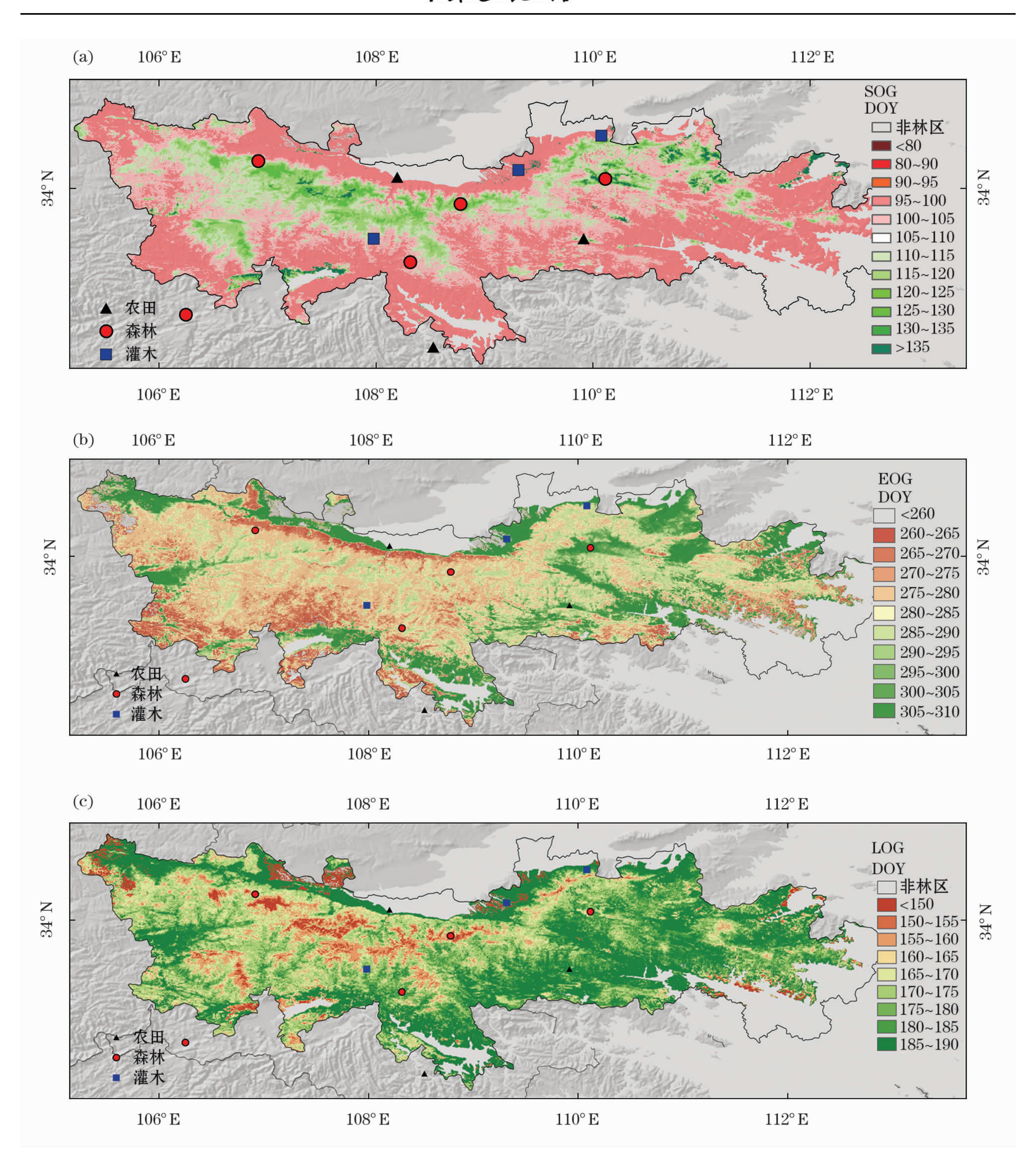


图 3　秦岭森林物候多年均值空间分布(2001—2018 年)(a) SOG;(b) EOG;(c) LOG

Fig. 3　Spatial distribution of forest average phenology over Qinling Moutains from 2001 to 2018 (a) SOG; (b) EOG; (c) LOG

势表明(图 4c),2001—2018 年秦岭林区 LOG 总体呈延长的趋势,其中 70% 的区域延长 1 ~3 d · a^{-1},呈延长趋势的区域中有 51% 的像元通过了显著性为 0.01 的显著性检验($P<0.01$)(图略),主要分布于中东部中高海拔区,秦岭地区有 30% 的生长季长度缩短,其缩短日数为 −1 ~0 d · a^{-1},主要分布在易受人类活动干扰的低海拔区。

4　秦岭森林物候与水热条件相关分析

4.1　秦岭地区气候背景特征

关于秦岭地区的水热条件变化已经有部分研究,主要集中在秦岭山南北麓春季和增温效应[45−50],降水呈现减少趋势[51−52]。2000—2017 年 18 a间秦岭地区的的平均气温呈上升趋势,变化率

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00159v1

图 4　秦岭森林物变化趋势空间分布（2001—2018 年）（a）:SOG;（b）:EOG;（c）:LOG

Fig. 4　Spatial distribution of the trend of forest phenology over Qinling Moutains from 2001 to 2018 (a):SOG; (b):EOG; (c):LOG

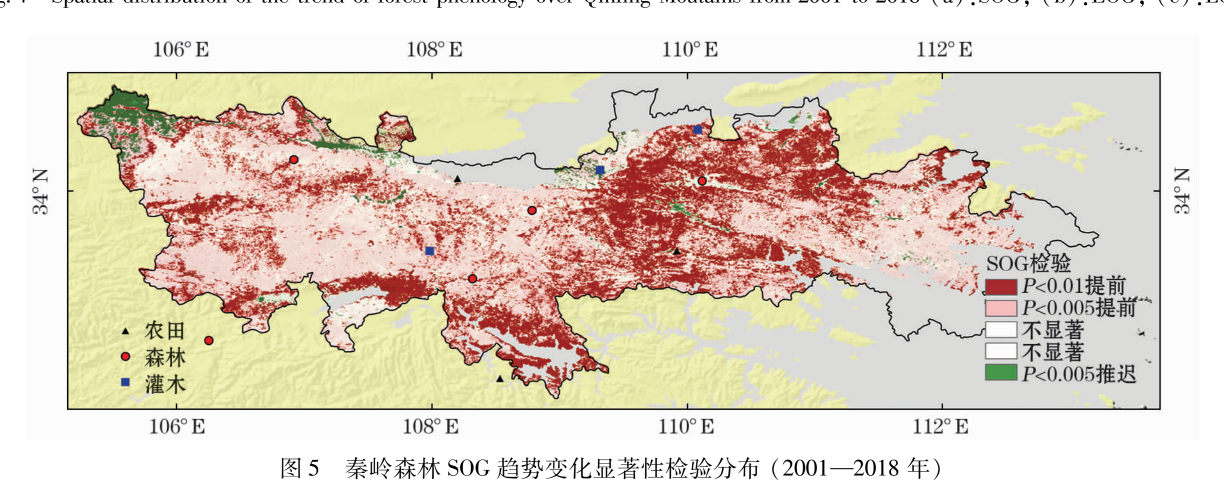


图 5　秦岭森林 SOG 趋势变化显著性检验分布（2001—2018 年）

Fig. 5　Distribution of significance testing of the trend of SOG over Qinling Mountains from 2001 to 2018

ChinaXiv合作期刊

为0.02 ℃·a^{-1},平均气温最高值为14.3 ℃(2013年),最低值为13.0 ℃(2003年和2011年)(图6)。降水量呈现出微弱的上升趋势,变化率为1.5 mm·a^{-1},降水量最高值为918.0 mm(2003年),最低值为539.5 mm(2001年)(图7)。日照时数呈现出下降趋势,变化率为14.6 h·a^{-1},日照时数最高值为2 048.4 h(2004年),最低值为1 378.3 h(2016年)(图8)。

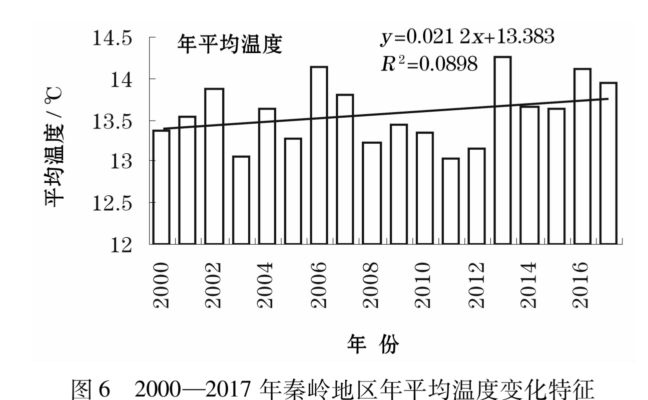


图6 2000—2017年秦岭地区年平均温度变化特征

Fig. 6 Annual average temperature over Qinling Mountains during 2000—2017

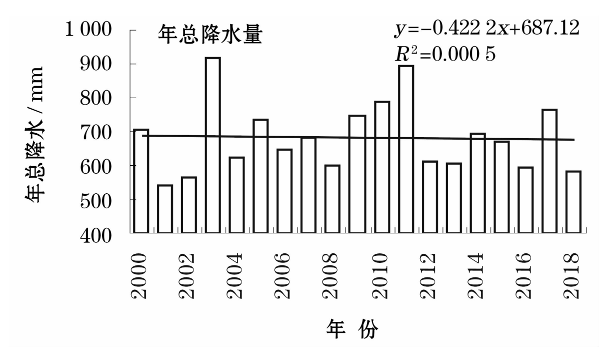


图7 2000—2017年秦岭地区年总降水量变化特征

Fig. 7 Total annual precipitation over Qinling Mountains during 2000—2017

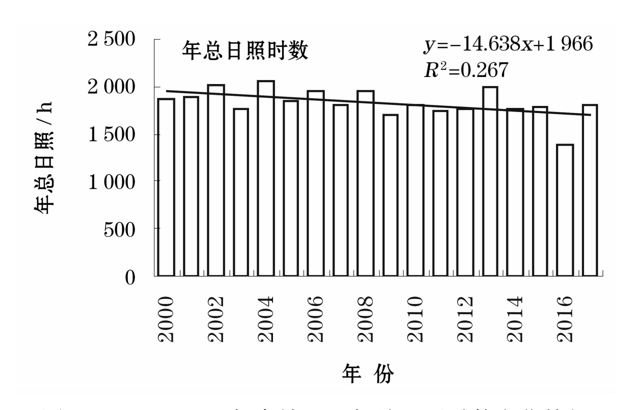


图8 2000—2017年秦岭地区年总日照时数变化特征

Fig. 8 Total annual sunshine duration over Qinling Mountains during 2000—2017

4.2 秦岭气候特征与物候的关系

植物物候改变主要受环境和气候变化影响,界限温度是指某些重要物候现象或农事活动之开始、终止或转折点的日平均温度,该温度对植物的生长有着重要的意义。与植物物候相关的几个重要界限温度分别为:0 ℃,稳定大于0 ℃的时期为适宜农耕期,其初日与终日和土壤结冻与解冻相近;5 ℃,稳定大于5 ℃的时期为越冬作物生长活动期和喜凉早春作物的播种期;10 ℃,稳定大于10 ℃的时期为越冬作物生长活跃期和喜温作物生长活动期。为了进一步明确秦岭地区的物候变化特征与界限温度的相关关系,本研究分别讨论0 ℃和10 ℃界限温度与2001—2017年秦岭物候变化特征之间的关系。

计算了秦岭地区55个站点2001—2017年稳定通过0 ℃、5 ℃和10 ℃的积温、降水和日照时数,同时提取了站点周围5 km范围内的SOG、EOG、LOG均值,将SOG、EOG、LOG分别与积温、降水和日照时数做相关性分析。

结果表明,稳定通过0 ℃的积温、降水和日照时数与SOG、EOG、LOG的相关性并不明显,而稳定通过5 ℃和10 ℃的积温、降水与SOG成负相关关系,与EOG、LOG呈正相关关系,稳定通过5 ℃和10 ℃的日照时数与SOG呈正相关,与EOG、LOG成负相关关系。SOG、EOG、LOG与积温的相关性要强于降水和日照,3个气候因子对物候参数的响应顺序为:积温>降水>日照。表明全球变化下的升温作用是影响秦岭森林物候变化的主要因子。

SOG总体同稳定通过的10 ℃的积温呈现负相关关系,其中有13个站点通过0.05显著性检验($P<0.05$),主要分布在秦岭山北麓的千阳、凤翔、岐山、扶风、华阴、秦岭山南麓的勉县、城固、洋县、石泉、镇安、商州、丹凤、商南等海拔高度在1 000~2 000 m之间年均积温在4 000~4 500 ℃的区域,在该区域内,升温作用导致SOG提前。而对于年均积温小于4 000 ℃的高山区,以及年均积温大于4 800 ℃人类活动影响较大的区域,SOG与积温相关性较小,表明在该区域内,增温对SOG影响不明显。

EOG和LOG总体同稳定通过10 ℃的积温呈正相关,其中LOG同积温相关性较高,15个站点通过0.05显著性检验($P<0.05$),通过检验的站点分布区域同SOG与积温显著相关的区域较为一致。表明秦岭南北麓海拔1 000~2 000 m之间(年均积温4 000~4 500 ℃)物候对积温响应较明显;高山区

chinaXiv:201909.00159v1

ChinaXiv合作期刊

(年均积温小于 4 000 ℃)物候响应比较复杂,可能由于针叶林带的太白红杉、巴西冷杉对温度变化异常敏感,而高山区活动积温增加缓慢,物候对活动积温响应较差;秦岭东部伏牛山境内站点(年均积温大于 4 900 ℃)同界限温度相关较低,表明秦岭东部区域受温度制约较小。

5 结 论

森林是全球生态系统的重要组成部分,森林生长季是反映短期或长期气候变化对森林生长阶段影响的综合性生物指标。本研究利用 NASA LPACC (Land Processes Distributed Active Center)提供的 2001—2018 年 C5 MOD09A1 产品,重建了秦岭地区增强型植被指数(*EVI*)时间序列,并评估了 Whittaker、DL、HANTS、AG 4 种算法在重建中的优缺点,使用最大变化速率和阈值法结合提取了秦岭物候参数,分析了秦岭地区物候参数时空分布和变化趋势,并讨论了秦岭地区物候变化与秦岭地区水热条件的关系。结果表明:

(1) 通过对增强型植被指数 *EVI* 重建算法比较得到:对于秦岭山脉地区,Whittaker 滤波法在灌木、农田、森林 3 种不同样地重建中相关性最优,DL 和 AG 次之且相当,HANTS 略差。Whittaker 滤波法在灌木、农田、森林 3 种不同植被覆盖的重建中与原始 *EVI* 之间的差异性最低,拟合值代表性强于 DL、AG 和 HANTS 法。因此,Whittaker 滤波在秦岭山地有较好的适用性。

(2) 2001—2018 年秦岭地区物候多年均值分布特征表明,沿着秦岭主要山脊由高海拔的高山区到农耕区,生长季始期(SOG)逐渐提前,生长季末期(EOG)逐渐推迟,生长季长度(LOG)由高海拔区向低海拔区逐渐增长,与秦岭地区地形分布较为一致。秦岭南北浅山区和东部伏牛山农耕带生长季开始较早,出现在 3 月上旬,高山区针叶林带生长季开始的较晚,出现在 5 月上旬到中旬(120 ~ 135 d)之间。EOG 集中出现在 270 ~ 310 d,高山区针叶林带生长季结束较早,秦岭处于浅山区生长季结束较晚,普遍出现在 11 月(300 d)以后。生长季长度(LOG)主要分布在 150 ~ 200 d 之间,低海拔地区 LOG 较长,大于 180 d,高海拔林区生长季较短 LOG 集中在 150 ~ 170 d。

(3) 2001—2018 年秦岭地区生长季节始期(SOG),生长季末期(EOG)和生长及长度(LOG)的年际变化趋势表明,生长季始期(SOG)分布总体呈现提前趋势,有 95% 的区域提前 1 ~ 2 $d \cdot a^{-1}$,高海拔区域 SOG 提前较明显,普遍在 2 $d \cdot a^{-1}$左右,南北麓海拔低于 500 m 部分区域和东部伏牛山少部分区域则呈现推迟趋势;生长季末期(EOG)总体呈现推迟趋势,其中秦岭北麓和东部中低海拔区域推迟明显,推后 2 ~ 3 $d \cdot a^{-1}$,生长期(LOG)总体呈延长的趋势,其中 72% 的区域延长 1 ~ 3 $d \cdot a^{-1}$。

(4) 秦岭地区 55 个站点 2000 年到 2017 年平均温度呈现上升趋势,增温幅度为 0.02 ℃ · a^{-1},年降水总量呈现不明显的增加,而年总日照时数则呈现明显的下降趋势,下降幅度为 14.6 $h \cdot a^{-1}$。

(5) 水热条件的变化,进一步影响了秦岭地区物候的变化特征。秦岭地区 55 个站点的稳定通过 0 ℃、5 ℃以及稳定通过 10 ℃的积温、降水和日照时数与秦岭地区物候参数相关关系分析表明,稳定通过 0 ℃的积温、降水和日照时数与 SOG、EOG、LOG 的相关性并不明显,而稳定通过 5 ℃和 10 ℃的积温、降水与 SOG 成负相关关系,与 EOG、LOG 呈正相关关系,稳定通过 5℃和 10℃的日照时数与 SOG 呈正相关,与 EOG、LOG 成负相关关系。SOG、EOG、LOG 与积温的相关性要强于降水和日照,3 个气候因子对物候参数的响应顺序为:积温 > 降水 > 日照。升温作用导致 SOG 提前、EOG 推迟、LOG 延长,秦岭南北麓海拔 1 000 ~ 2 000 m 之间物候对 10 ℃积温响应较明显,高山区物候响应比较复杂,可能由于针叶林带的太白红杉、巴西冷杉对温度变化异常敏感,而高山区活动积温增加缓慢,物候对活动积温响应较差,秦岭东部伏牛山境内站点与界限温度相关性较低,表明秦岭东部区域受温度制约较小。

参考文献(References)

[1] PING Y P,ZANG S Y. Crop identification based on MODIS NDVI time-series data and phenological characteristics[J]. Journal of Natural Resources,2016,31(3):503 – 513.

[2] HE Y,FAN G F,ZHANG X W,et al. Vegetation phenological variation and its response to climate changes in Zhejiang Province[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(2):220 – 233.

[3] ATZBERGR C,EILERS P H C. A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America[J]. International Journal of Digital Earth,2011,4(5):365 – 386.

[4] BECK P S A,ATZBERGR C,HOGDA K A. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes:A new method using

chinaXiv:201909.00159v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00159v1

MODIS NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3):321－334.
[5] SAKAMOTO T, YOKOZAWA M, TORITANI H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(3):366－374.
[6] CHEN J, JÖNSSON P, TAMURA M. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3):332－344.
[7] JULIEN Y, SOBRINO J A. Global land surface phenology trends from GIMMS database[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30:3495－3513.
[8] WANG G C, CAO R Y, CHEN J, RAO Y. Temperature sensitivity of spring vegetation phenology correlates to within-spring warming speed over the Northern Hemisphere[J]. Ecological Indicators, 2015. 50(3):62－68.
[9] WHITE M A, DEBEURS K M, DIDAN K. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982—2006[J]. Global Change Biology, 2009, 15:2335－2359.
[10] ZHANG X Y, FRDED M A, SCHAAF C B. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84:471－475.
[11] LLOYD D A. Phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery[J]. INT J Remote Sense, 1990, 11:2269－2279.
[12] FISHER J I, MUSTARD J F. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat and MODIS data[J]. Remote Sensing of Environmen, 2007, 109(3):261－273.
[13] KROSS A, FERNANDES R, SEAQUIST J, et al. The effect of the temporal resolution of NDVI data on season onset dates and trends across Canadian broadleaf forests[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(6):1564－1575.
[14] PIAO S L, CIAIS P. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming[J]. Nature, 2008, 451:49－52.
[15] ATKINSON P M, JEGANATHAN C, DASH J, et al. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123(8):400－417.
[16] 方修琦,余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5):714－719. [FANG Xiuqi, YU Weihong. Progress in the studies on the phenological responding to global warming[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(5):714－719.]
[17] 郑景云,葛全胜,郝志新. 气候增暖对我国近40年植物物候变化的影响[J]. 科学通报, 2002, 47(20):1582－1587. [ZHENG Jingyun, GE Quansheng, HAO Zhixin. Effects of global warming on plant phenological changes for the last 40 years in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(20):1584－1587.]
[18] 张学霞,葛全胜,郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系——基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):499－506. [ZHANG Xuexia, GE Quansheng, ZHENG Jingyun. Relationships between climate change and vegetation in Beijing using remote sensed data and phonological data[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4):499－506.]
[19] 陆佩玲,于强,贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2006, 26:923－929. [LU Peiling, YU Qiang, HE Qingtang. Responses of plant phenology to climatic change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3):923－929.]
[20] 李明,吴正方,杜海波,等. 基于遥感方法的长白山地区植被物候期变化趋势研究[J]. 地理科学. 2011, 31(10):1242－1248. [LI Ming, WU Zhengfang, DU Haibo, et al. Growing-season trends determined from SPOT NDVI in Changbai Mountains, China, 1999—2008[J]. Scientia Geographic Sinica, 2011, 31(10):1242－1248.]
[21] 何月,樊高峰,张小伟,等. 浙江省植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2013, 28(2):220－233. [HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al. Vegetation phenological variation and its response to climate changes in Zhejiang Province[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(2):220－233.]
[22] 王连喜,陈怀亮,李琪,等. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(2):447－454. [WANG Lianxi, CHEN Huailiang, LI Qi, et al. Research advances in plant phenology and climate[J]. Acta Ecological Sinica, 2010, 30(2):447－454.]
[23] 仲舒颖,郑景云,葛全胜. 近40年中国东部木本植物秋季叶全变色期变化[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1):1－4. [ZHONG Shuying, ZHENG Jingyun, GE Quansheng. Change of autumnal leaf coloring of woody plants in Eastern China for the last 40 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1):1－4.]
[24] 王传海,吴飞倩,李淑娟. 西安植物园木本植物近十余年物候变化的特征分析[J]. 中国农业气象, 2006, 27(4):261－264. [WANG Cuanhai, WU Feiqian, LI Shujuan. Phenological changes of ligneous plants in Xi'an Botanic Garden in last 15 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2006, 27(4):261－264.]
[25] 谢宝妮,秦占飞,王洋,等. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15):153－160. [XIE Baoni, QIN Zhanfei, WANG Yang, et al. Monitoring vegetation phenology and their response to climate change on Chinese Loess Plateau based on remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(15):153－160.]
[26] 李登科,范建忠,权文婷. 陕西省植被退化及其驱动因素分析[J]. 生态学杂志, 2015, 34(10):2907－2913. [LI Dengke, FAN Jianzhong, QUAN Wenting. Analysis of vegetation degradation and its driving factors in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(10):2907－2913.]
[27] 宋辉,刘康,范亚宁. 秦岭山地森林退化时空变化分析[J]. 中国人口资源与环境, 2016, 5:153－157. [SONG Hui, LIU Kang, FAN Yaning. China forest degradation spatial and temporal variation analysis of Qinling Mountains[J]. Population, Resources and Environment, 2016, 5:153－157.]
[28] 夏浩铭,李爱农,赵伟,等. 2015、2001—2010年秦岭森林物候时空变化遥感监测[J]. 地理科学进展, 34(10):1297－1305. [XIA Haoming, LI Ainong, ZHAO Wei, et al. Spatiotemporal variations of forest phenology in the Qinling zone based on remote sensing monitoring 2001—2010[J]. Progress in Geography, 2015, 34(10):1297－1305.]
[29] 贺映娜. 秦岭植被物候期及遥感生长季的变化研究[D]. 西安:西北大学, 2012. [HE Yingna. Research on the variatition of vegetation phenology in Qinling Moutain base on remote sensing and in situ obersation[D]. Xi'an:Northwest University, 2012.]

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00159v1

[30] 张晗,任志远. 基于 Whittaker 滤波的陕西省植被物候特征[J]. 中国沙漠,2015,35(4):901－903.[ZHANG Han,REN Zhiyuan. Remote sensing analysis of vegetation phenology characteristics in Shaanxi Province based on Whittaker smoother method[J]. Journal of Desert Research,2015,35(4):901－906.]

[31] 张殷波,郭柳琳,王伟. 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区[J]. 生态学报,2014,34(8):2109－2117.[ZHANG Yinbo,GUO Liulin,WANG Wei,et al. Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(8):2109－2117.]

[32] 尚升海,邢海. 秦岭南北坡植被垂直分布的差异比较[J]. 园林生态. 2016,1(1):114－115.[SHANG Shenghai,XING Hai,Comparison of vertical distribution of vegetation on north and south slopes of Qinling Mountains[J]. landscape and Ecology,2016,1(1):114－115.]

[33] 杨嘉,郭铌,黄蕾诺,等. 西北地区 MODIS-*NDVI* 指数饱和问题分析[J]. 高原气象,2008,27(4):896－903.[YANG Jia,GUO Ni,HUANG Leinuo,et al. Analyses on MODIS-*NDVI* Index Saturation in Northwest China[J]. Plateau Meteor,2008,27(4):896－903.]

[34] 刘亚南,肖飞,杜耘. 基于秦岭样区的四种时序 EVI 函数拟合方法对比研究[J]. 生态学报. 2016,36(15):4672－4679.[LIU Yanan,XIAO Fei,DU Yun. Analysis of four time series EVI data reconstruction methods[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(15):4672－4679.]

[35] 宋春桥,柯灵红,游松财. 基于 TIMESAT 的 3 种时序 NDVI 拟合方法比较研究——以藏北草地为例[J]. 遥感技术与应用. 2011,26(2):147－155.[SONG Chunqiao,KE Linghong,YOU Songcai. Comparison of three NDVI time-series fitting methods based on TIMESAT:Taking the grass land in Northern Tibetan as case[J]. Remote Sensing Technology and Application,2011,26(2):147－155.]

[36] CHEN J,JÖNSSOM P,TAMURA M,et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. Remote Sensing of Environment,2004. 91(3－4):332－344.

[37] 李杭燕,颉耀文,马明国. 时序 *NDVI* 数据集重建方法评价与实例研究[J]. 遥感技术与应用,2009,24(5):596－602.[LI Hangyan,XIE Yaowen,MA Mingguo. Reconstruction of temporal *NDVI* dataset:Evaluation and case study[J]. Remote Sensing Technology and Application,2009,24(5):596－602.]

[38] 王乾坤,于信芳,舒清态,等. MODIS EVI 时序数据重建方法及拟合分析[J]. 地球信息科学学报,2015,17(6):732－741.[WANG Qiankun,YU Xinfang,SHU Qingtai,et al. Comparison on three algorithms of reconstructing time-series MODISEVI[J]. Journal of Geo-Information Science,2015,17(6):732－741.]

[39] 周惠慧,王楠,黄瑶,等. 不同时间间隔下的遥感时间序列重构模型比较分析[J]. 地球信息科学学报,2016,18(10):1410－1417.[ZHOU Huihui,WANG Nan,HUANG Yao,et al. Comparison and analysis of remotely sensed time series of reconstruction models at various intervals[J]. Journal of Geo-information Science,2016,18(10):1410－1417.]

[40] 刘玲玲,刘良云,胡勇. 1982—2006 年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析[J]. 地理科学进展,2012,31(11):1433－1442.[LIU Lingling,LIU Liangyun,HU Yong. Assessment and intercomparison of satellite-derived start-of-season (SOS) measures in Eurasia for 1982—2006[J]. Progress in Geography,2012,31(11):1433－1442.]

[41] 丁明军,张镱锂,孙晓敏,等. 近 10 年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析[J]. 科学通报,2012,57(33):3185－3194.[DING Mingjun,ZHANG Yili,SUN Xiaomin,et al. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009[J]. Chinese Science Bulletin,2012,58(3):396－405.]

[42] 范德芹,赵学胜,朱文泉,等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述[J]. 地理科学进展,2016,35(3):304－319.[FAN Deqin,HAO Xuesheng,ZHU Wenquan,et al. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data[J]. Progress in Geography,2016,35(3):304－319.]

[43] 曹沛雨,张雷明,李胜功,等. 植被物候观测与指标提取方法研究进展[J]. 地球科学进展,2016,31(4):365－376.[CAO Peiyu,ZHANG Leiming,LI Shenggong,et al. Review on vegetation phenology observation and phenological index extraction[J]. Advanced Earth Science,2016,31(4):365－376.]

[44] 白洁,葛全胜,戴君虎. 西安木本植物物候与气候要素的关系[J]. 植物生态学报,2010,34(11):1274－1282.[BAI Jie,GE Quansheng,DAI Junhu,et al. Relationship between woody plants phenology and climate factors in Xi'an,China[J]. Chinese journal of Plant Ecology,2010,34(11):1274－1282.]

[45] 李双双,延军平,万佳. 全球气候变化下秦岭南北气温变化特征[J]. 地理科学,2012,32(7):853－858.[LI Shuangshuang,YAN Junping,WAN Jia. The characteristics of temperature change in Qinling Mountains[J]. Scientia Geographica Sincia,2012,32(7):853－858.]

[46] 韦振锋,任志远,张翀. 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区气候对植被物候的影响[J]. 水土保持通报,2014,34(5):232－236.[WEI Zhenfeng,REN Zhiyuan,ZHANG Chong. Impact of climate on vegetation phenology on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia Region during 1999—2010[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2014,34(5):232－236.]

[47] 王钊,罗慧,李亚丽,等. 近 50 年秦岭南北不均匀增温及对城市化响应[J]. 应用气象学报,2016,(1):84－94.[WANG Zhao,LUO Hui,LI Yali,et al. Effects of Urbanization on Temperatures over the Qinling Mountains in the Past 50 Years[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology,2016,(1):84－94.]

[48] 王钊,彭艳,魏娜. 近 52 a 秦岭南北极端温度变化及其与区域增暖的关系[J]. 干旱气象,2016,34(2):269－275.[WANG Zhao,PENG Yan,WEI Na. Variation trends of the extreme temperature and its relationship with regional warming in the South and North sides of the Qinling Mountain during 1961—2012[J]. Arid Meteorology,2016,34(2):269－275.]

[49] 周旗,卞娟娟,郑景云. 秦岭南北 1951—2009 年的气温与热量资源变化[J]. 地理学报,2011,66(9):1211－1218.[ZHOU Qi,BIAN Juanjuan,ZHENG Jingyun. Variation of air temperature and thermal resources in the Northern and Southern regions of the Qinling Mountains from 1951 to 2009[J]. Acta Geographica Sinica,2011,66(9):1211－1218.]

[50] 张立伟,宋春英,延军平. 秦岭南北年极端气温的时空变化趋势研究[J]. 地理科学,2011,31(8),1007－1011.[ZHANG Liwei,SONG Chunying,YAN Junping. Spatio-temporal trends of annual extreme temperature in Northern and Southern Qinling

ChinaXiv合作期刊

Mountains[J]. Scientia Geographica Sinca,2011,31(8):1007 - 1011.]

[51] 彭艳,王钊. 1960—2012 年陕西降水变化特征及可能成因分析[J]. 高原气象,2016,35(4):1050 - 1059. [PENG Yan,WANG Zhao,DONG Yan,et al. Characteristics and reasons of local changing of precipitation over Shaanxi during 1960—2012[J]. Plateau Meteor,2016,35(4):1050 - 1059.]

[52] 王晓玲,任燕. 秦岭山区近 50 年降水差异及可能局地成因探讨[J]. 气候与环境研究,2012,17(6):911 - 918. [WANG Xiaoling,REN Yan. Analysis of precipitation differences and their local causes in the last 50 years around the Qinling Mountains[J]. Climatic & Environmental Research,2012,17(6):911 - 918.]

Characteristic of plant phenology and its response to the hydrothermal conditions over Qinling Mountains

WANG Zhao, PENG Yan, QUAN Wen-ting, HE Hui-juan, LI Deng-ke

(1 *Agricultural Remote Sensing and Economic Crop Meteorological Service Center of Shaanxi*, *Xi'an* 710014, *Shaanxi*, *China*;
2 *Meteorological Institute of Shaanxi Province*, *Xi'an* 710014, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: Based on the product of C5 MOD09A1 from Land Processes Distributed Active Center (NASA LPACC) from 2001 to 2018, the Enhanced Vegetation Index (*EVI*) over Qinling Mountains, the geographical boundary of south-north China, is reconstructed. The four reconstruction methods, Whittaker, DL, HANTS and AG algorithms were evaluated. Then the phenological parameters of Qinling Mountains was extracted with the maximum change rate and threshold method. We got the followed results. The Whittaker filter method is generally the best among the four methods in reconstructing the EVI of shrubs, fields and forests over Qinling Mountains. And the EVI from the Whittaker filter method shows the lowest difference from the original EVI in the reconstruction of shrub, farmland and forest cover with higher representative than that from the DL, AG and HANTS algorithms. Along the main ridge of the Qinling Mountains from the high elevations to the farming area, the start of growth season is gradually moved earlier, the end of growth season is gradually delayed and the length of growth seasons become much longer. The growing season in the northern and southern shallow-mountain areas and Funiu Mountains starts in early March, while it begins in early and mid-May (120 - 135 d of the year) in the coniferous forest belt. While the end of growth season in the coniferous forest belt ends earlier than that of shallow-mountain areas which mainly appear in early of November, and both of them is mainly in the range of 270 - 310 d of the year. The length of the growth (LOG) season over Qinling Mountains is mainly about 150 - 200 d, and the LOG at lower elevation (about 180 d) is longer than that of forest regions at higher elevation which is about 150 - 170 d. The distribution of the initial period of SOG over 95% areas of the Qinling Mountains generally shows an advance of 1 - 2 d, especially for the high-altitude area, which shows an obvious advance trend with about 2 $d \cdot a^{-1}$, while there is a delay trend over the areas with the elevation lower than 500 m and the Funiu mountains. There is a delayed trend of the growth seasons (EOG) over Qinling Mountains, especially over the north of Qinling Mountains and low-altitude areas (about 2 - 3 $d \cdot a^{-1}$). Furthermore, the length of growth seasons over Qinling Mountains become longer, and the change range of 72% of the forest is about 1 - 23 $d \cdot a^{-1}$. There is a slightly increased trend of average temperature with a rate of 0.02 $℃ \cdot a^{-1}$, while the total annual sunshine duration is decreased with a rate of 14.6 $h \cdot a^{-1}$ over the Qinling Mountains. The change of hydrothermal conditions further affected the phenological parameters of Qinling Mountains. The correlation analysis between accumulated temperature, total precipitation and total sunshine duration and the phenological parameters at the temperatures of 0 ℃, 5 ℃ and 10 ℃ respectively, which shows that the response sequence of the phenological parameters to the three climatic factors is: accumulated temperature > precipitation > sunshine. The increasing of temperature slightly leads to an earlier SOG, a delayed EOG and a longer LOG, especially in the areas with the elevation between 1 000 and 2 000 m over the southern and northern part of Qinling Mountains. While for higher mountains the correlations becomes more complex. The response of phenological parameters to accumulated temperature over Funiu Mountains in the east of Qinling Mountains is not obvious and there may be some other restriction factors.

Key words: Qinling Mountains; phenological parameters; EOG; SOG; LOG

chinaXiv:201909.00159v1